

УДК 621.7

Я.Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук, Харьков, Украина

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛОЙНОГО ПОСТРОЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРИЕНТАЦИИ ИЗДЕЛИЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ УСТАНОВКИ

Представлено результати дослідження можливостей статистичного аналізу характеристик шарів побудови виробу, одержуваного на основі вихідної 3D-моделі з використанням адитивних технологій. Тестова модель було досліджено в безлічі варіантів орієнтації у робочому просторі установки. Розсічення моделі для отримання набору шарів виконувалося за стратегіями з постійним і змінним кроком побудови. Одержані результати створюють основу для спільного виконання задач технологічної підготовки 3D-моделі.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, пошарове розсічення, точність формоутворення.

Представлено результаты исследования возможностей статистического анализа характеристик слоев построения изделия, получаемого на основе исходной 3D-модели с использованием аддитивных технологий. Тестовая модель была исследована во множестве вариантов ориентации в рабочем пространстве установки. Рассечение модели для получения набора слоев выполнялось по стратегиям с постоянным и переменным шагом построения. Полученные результаты создают основу для совместного решения задач технологической подготовки 3D-модели.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, послойное рассечение, точность формообразования.

The study results of statistical analysis of characteristics of layered build of product on basis of original 3D model using additive technologies are presented. The test model was studied in a variety of orientation options in the installation workspace. Model slicing for obtaining a layer set was performed according to strategies with constant and variable step of the build. The results provide the basis for the joint solution of tasks of technological preparation of 3D-model.

Keywords: additive manufacturing, technological preparation, layered slicing, shaping accuracy.

Введение. Одними из основных задач подготовки к материализации изделия аддитивными технологиями являются послойное разделение исходной 3D модели, ориентация и ее размещение в рабочем пространстве установки [1]. При решении данных задач достаточно существенно определяется эффективность использования аддитивных технологий. Например, количество слоев влияет на время построения изделия. Точность послойного формообразования в основном определяется толщиной слоев и ориентацией поверхности, задаваемой при размещении в рабочем пространстве установки [2, 3]. Эффективность применения аддитивных технологий находится на крайне низком уровне, как по качеству получаемой поверхности так и по производительности и себестоимости изготовления [4]. Одним из объяснений такого обстоятельства является особенности технологии послойного построения изделий.

Анализ последних исследований и публикаций. Основная проблема применения аддитивных технологий заключается в том, что принято выполнять оптимизационные задачи технологической подготовки последовательно. В известных работах [5-7] задание рациональной ориентации изделия в рабочей области послойного построения выполняют с учетом выбранного одного или нескольких факторов [6]. Учитывая возможность применения общих критериев оценки эффективности использования аддитивных технологий, представляется целесообразным совместное выполнение рассматриваемых задач [1]. Также в таком случае появляются возможности для определения ранее не выявляемых областей оптимальных значений характеристик процесса послойного построения. Сделаны предположения, что на основе распределения шага построения по оси Z становится возможным совмещение задач с позиций обеспечения производительности. Учитывая определяющее влияние на шаг построения статистических характеристик распределения углов наклона нормалей поверхностей относительно оси Z в отдельности по слоям построения они также могут рассматриваться в качестве исследуемых признаков. Использование распределения характеристик сечения (площади, размеров и центра масс) может позволить реализовать совмещение задач с позиций рационального размещения и ориентации для обеспечения наибольшего относительного используемого (полезного) объема рабочего пространства установки.

В данной работе рассмотрена научная гипотеза о том, что статистический анализ характеристик слоев рассеечения 3D модели таких как шаг построения и площадь сечения позволяют создать основу для совместного решения технологических задач подготовки к получению изделия аддитивными технологиями для обеспечения заданной точности, уменьшения времени построения изделия и увеличения полезного используемого объема рабочего пространства установки.

Цель статьи – изучить возможности статистического анализа характеристик послойного построения изделия для создания основ совместного выполнения задач подготовки 3D-модели к изготовлению аддитивными технологиями.

Основная часть. Исследования выполнялись в системе технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "Харьковский политехнический институт". Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции и эффективности решения задач технологической подготовки на основе статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной 3D модели изделия. Для решения поставленной задачи усовершенствована подсистема статистического послойного анализа. Вид

подсистемы с формой визуального анализа распределения исследуемых признаков слоев построения представлена на рис. 1.

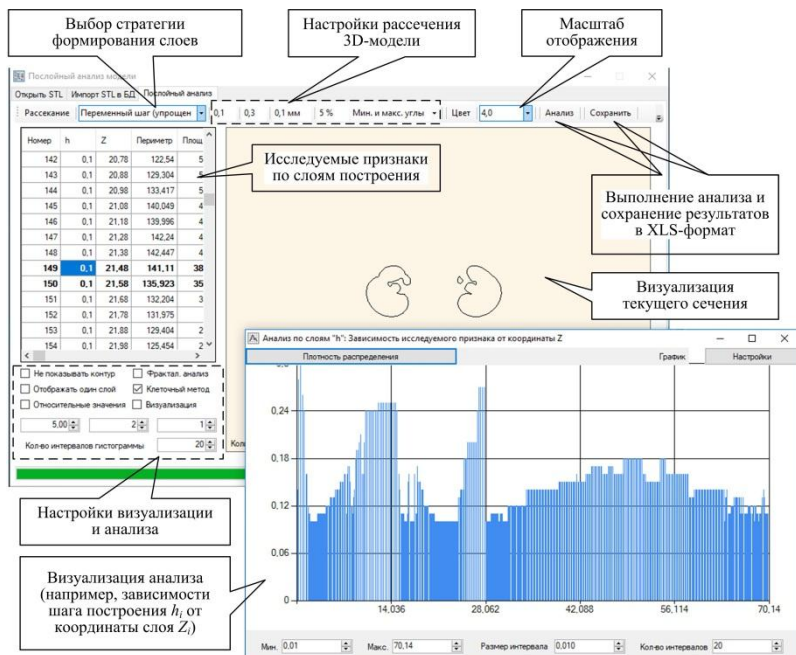


Рисунок 1 – Подсистема послойного анализа 3D-модели изделия

Разработанная подсистема предоставляет пользователю следующие основные возможности:

- создание набора слоев с 2D-сечениями на основе полигональной 3D-модели изделия (STL-файла) по заданной стратегии формирования (с постоянным или переменным шагом построения);
- визуализация контура сечения изделия для текущего слоя с учетом масштаба отображения;
- статистический анализ и построение гистограмм распределения исследуемых признаков (углов наклона нормалей граней пересекаемых слоев относительно оси Z и величин отклонений от правильной формы, вызванных формированием ступенек);
- определение основных статистических характеристик исследуемых признаков, которые выводятся в единую таблицу для всех слоев;
- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности, интегральной функции вероятности или зависимости от координат слоев по оси Z .

Переход от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к набору слоев выполнялся по процедурам, разработанным с учетом существующих работ [8-10], реализующих стратегии с постоянным и переменным шагом построения.

Исследование возможностей статистического анализа характеристик послойной 3D-модели выполнялось с использованием изделия, имеющего сложные по геометрии поверхности. В качестве тестовой модели выбрано изделие "Сувенир", представленное на рис. 2. Тестовая модель состоит из 207 024 треугольных граней (общая площадь $S_m \approx 11\,988 \text{ мм}^2$), габаритные ее размеры по осям X , Y , Z – 72.97 мм, 51.27 мм, 70.13 мм.

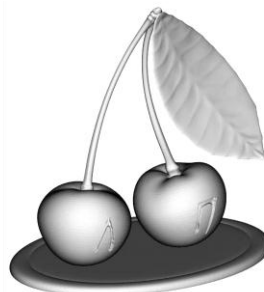


Рисунок 2 – Тестовая 3D-модель

Стратегия с постоянным шагом выполнялась при $h_i = 0.1$ мм. Стратегия с переменным шагом $h_i \in [0.1, 0.3]$ мм. Шаг построения определяется с учетом допустимой (максимальной) погрешности формирования поверхности $\Delta_s = 0.1$ мм по следующей зависимости:

$$h_i = \begin{cases} h_{\min}, & h_{iC} < h_{\min} \\ h_{iC}, & h_{\min} < h_{iC} < h_{\max} \\ h_{\max}, & h_{\max} < h_{iC} \end{cases}, \quad (1)$$

где h_{iC} – расчетная величина шага построения, $h_{iC} = \Delta_s / \cos \varphi_{NZ \min}$ [11];

$\varphi_{NZ \min}$ – минимальный угол наклона относительно оси Z нормали граней в текущем слое;

h_{\min} , h_{\max} – предельно допустимые значения переменного шага построения, минимальное и максимальное соответственно.

На первом этапе исследования создавался набор 3D-моделей изделия с различной ориентацией в пространстве. Преобразование системы координат 3D-модели осуществлялось поворотом вокруг осей X и Y . Углы поворота $\alpha_{x,y} \in [0, 180)$ задавались с дискретностью 30° . В результате набор содержал 36 моделей изделия. На втором этапе путем рассечения 3D-модели по стратегии с постоянным или переменным шагом построения получали набор слоев. На третьем – статистический анализ распределения следующих исследуемых признаков послойных моделей: шаг построения h_i , отклонения от правильной формы поверхностей E_i , координаты слоев построения z_i , периметр контура слоя P_i , площадь сечений модели S_i . Также рассматривались общепринятые интегрированные показатели [11, 12]: количество слоев N_l и высота

построения H .

По результатам модельных исследований получены зависимости, которые являются частными для конкретного изделия (рис. 2). Такое обстоятельство требует выполнения предварительного подобного анализа каждой модели, поступающей для получения изделия аддитивными технологиями. Для ряда технологий количество слоев является основной характеристикой, определяющей время изготовления. Например, для технологии SLS время построения не существенно зависит от площади сечений и глубины спекаемого слоя, поэтому зависимость $T_{work} = f(N_l)$ приближенно имеет линейный вид [11].

На рис. 3 представлены графики зависимостей количества слоев построения N_l от углов α_x, α_y поворота системы координат 3D-модели изделия вокруг осей X и Y . Зависимости $N_l = f(\alpha_x, \alpha_y)$ рассматривались для двух стратегий рассечения 3D-модели изделия с постоянным (рис. 3 а) и переменным (рис. 3 б) шагом построения. При построении с постоянным шагом количество слоев N_l имеет прямую пропорциональную зависимость с высотой построения H . Высота построения в зависимости от ориентации изделия изменяется в следующих пределах $51.29 \div 80.83$ мм (среднеарифметическое значение $E\{H\} = 63.13$ мм). Для стратегии с переменным шагом количество слоев N_l определяется высотой построения изделия и его геометрической сложностью с учетом зависимости (1).

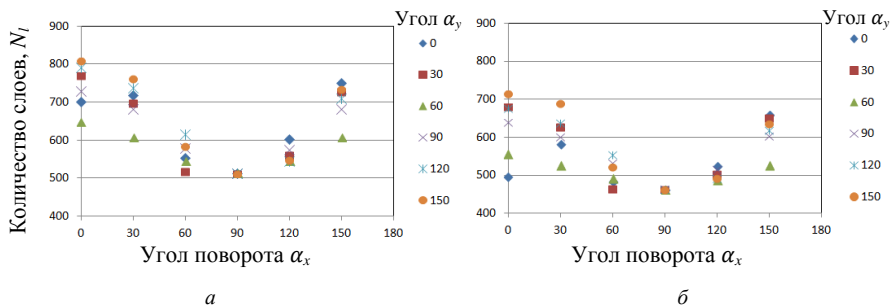


Рисунок 3 – Зависимость количества слоев построения N_l от углов α_x, α_y поворота системы координат модели при ее рассечении по стратегии:
а – постоянного шага; б – переменного шага

Модельные данные показывают, что стратегия с переменным шагом построения, определяемого по зависимости (1), позволяет уменьшить количество слоев на $8 \div 29\%$ в зависимости от ориентации изделия.

На рис. 4 представлены зависимости среднеарифметических значений шагов построения $E\{h\}$ от ориентации 3D-модели изделия при ее рассечении по стратегии переменного шага построения.

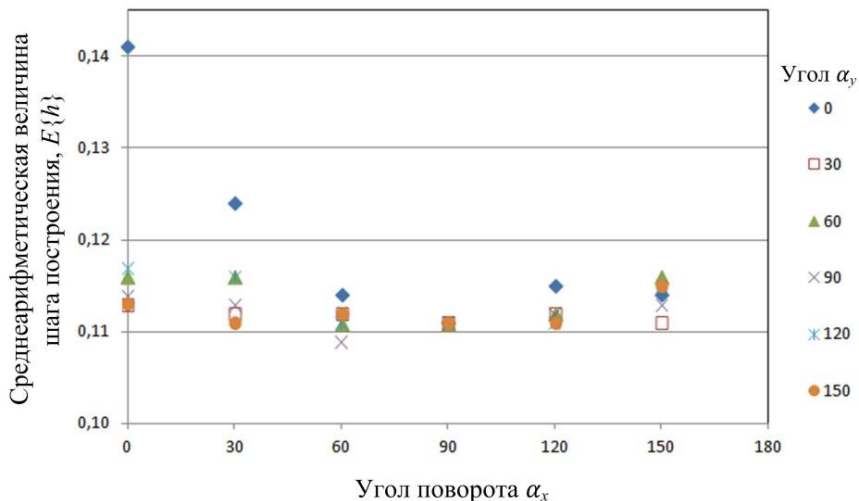
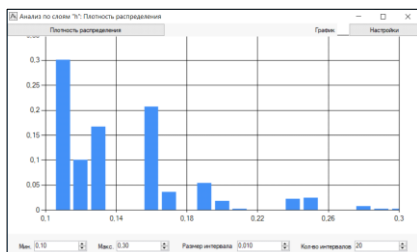


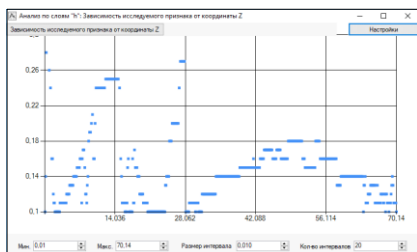
Рисунок 4 – Зависимость среднеарифметической величины шага построения $E\{h\}$ от углов α_x , α_y поворота системы координат 3D-модели

В зависимости от выбранного критерия оптимизации N_i , H_i и $E\{h_i\}$, елеи получены отличающиеся варианты рациональной ориентации 3D-модели. Поэтому такой критерий необходимо выбирать с учетом условий получения изделия (единичной или массовой загрузки изделиями установки). При изготовлении одного изделия целесообразно оптимизацию углов поворота модели α_x , α_y осуществлять по количеству слоев N_i (при стратегии с переменным шагом) или высоте построения H_i (при стратегии с постоянным шагом). В случае совместного изготовления нескольких изделий с целью обеспечения наибольшей удельной производительности следует оптимизацию осуществлять по величине $E\{h_i\}$.

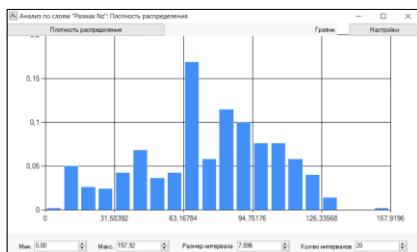
С целью повышения информативности статистического анализа исследуемых признаков послойной модели предусмотрены в разработанной системе (рис. 1) инструменты для визуального анализа с расширенными возможностями для настроек графиков. На рис. 5 представлены примеры гистограмм распределения исследуемых признаков слоев и их взаимосвязи с координатами плоскостей рассеяния 3D-модели Z_i . Наиболее презентабельными для визуального анализа являются следующие характеристики: шаг построения h_i , углы наклона относительно оси Z нормалей поверхностей N_z , погрешность формы Δ_s , координаты плоскостей рассеяния Z_i , периметры контуров сечений p_i , площади сечений S_i .



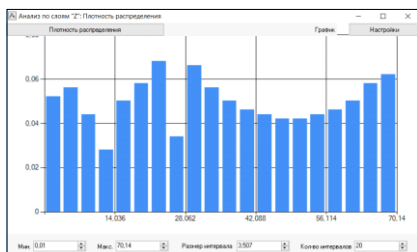
а



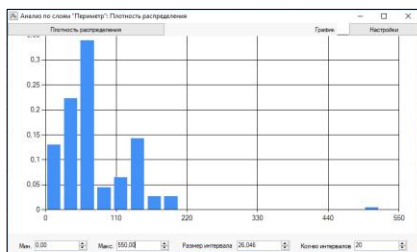
б



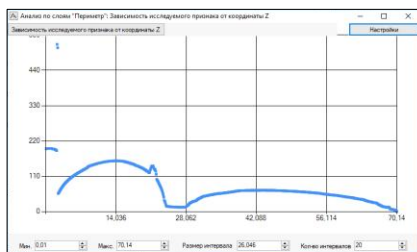
в



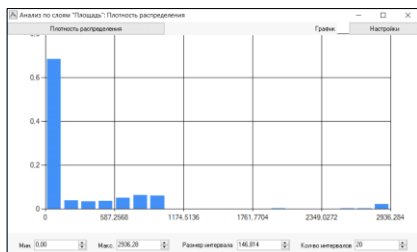
г



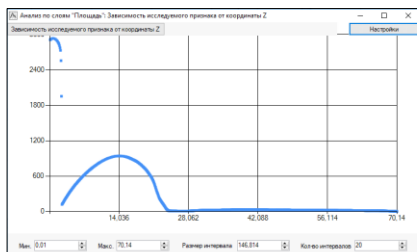
д



е



ж



з

Рисунок 5 – Визуальный анализ исследуемых признаков 3D-модели:
 а, в, г, д, ж – гистограммы плотности распределения величин шага построения h_i ,
 размаха углов наклона относительно оси Z нормалей поверхностей 3D-модели ΔN_z ,
 координат плоскостей рассечения 3D-модели Z_i , периметра контуров сечений p_i ,
 площади сечений S_i ; б, е, з – зависимости $h_i = f(Z_i)$, $p_i = f(Z_i)$, $S_i = f(Z_i)$

Исходя из особенностей методов послойного построения изделий и требований к задачам технологической подготовки можно сделать следующие предположения об информативности выбранных исследуемых признаков:

- плотность распределения шагов построения h_i (рис. 5а) для оценки эффективности используемой стратегии послойного рассечения;
- зависимости $h_i = f(Z_i)$ и $S_i = f(Z_i)$ (рис. 5б, з) и плотность распределения величин h_i (рис. 6) и площади сечений S_i (рис. 5ж) для оценки эффективности ориентации (задача определения рациональных значений углов α_x, α_y) на основе определения соответствия распределения слоев по оси Z изделия и рабочего пространства установки (с размещенными изделиями);
- плотность распределения основных статистических характеристик угла наклона относительно оси Z нормалей φ_{NZmin} поверхностей по слоям (рис. 5в) для обоснованной оценки эффективности стратегии послойного рассечения с учетом геометрической сложности поверхностей изделия;
- плотность распределения периметров контуров сечений p_i (рис. 5д) и взаимосвязь $p_i = f(Z_i)$ в дополнение к $S_i = f(Z_i)$ (рис. 5е, з) позволяет оценивать сложность изделия;
- плотность распределения плоскостей рассечения Z_i (рис. 5г) аналогична по информативности с $h_i = f(Z_i)$ (рис. 5б) благодаря обратной взаимосвязи.

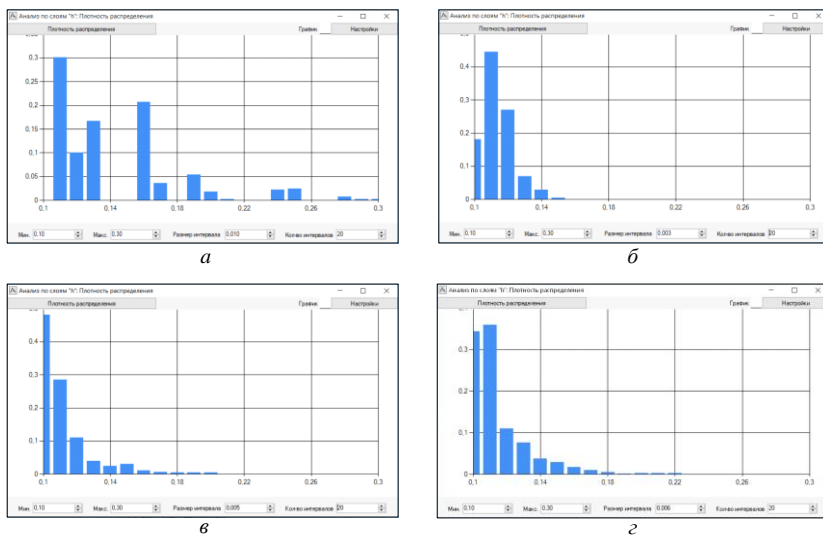


Рисунок 6 – Гистограммы плотности распределения величин шага построения h_i в зависимости от углов поворота системы координат 3D-модели изделия:

а – $\varphi_X = 0, \varphi_Y = 0$; б – $\varphi_X = 0, \varphi_Y = 30$; в – $\varphi_X = 90, \varphi_Y = 0$; г – $\varphi_X = 0, \varphi_Y = 90$

На рис. 5 представлены результаты анализа одного варианта ориентации. Визуальный анализ исследуемых признаков массива вариантов ориентации подтверждает их информативность для определения рациональных значений углов поворота модели α_x , α_y . Модальные величины на гистограммах плотности распределения величин шага построения h_i и их частоты (рис. 6) позволяют судить об эффективности выбранной ориентации модели изделия. Например, вариант распределения, представленный на рис. 6а, является наиболее рациональным в условиях получения нескольких изделий при однократной загрузке установки.

Сравнительный анализ распределений исследуемых величин по вариантам ориентации модели изделия получается достаточно информативным при использовании диаграмм размаха "Box Whiskers". Такие диаграммы показывают информацию по квартилям распределения исследуемых величин. Сравнение на одной диаграмме нескольких вариантов ориентации по значениям квартилей распределения величин шага построения (рис. 7) расширяет возможности визуального анализа.

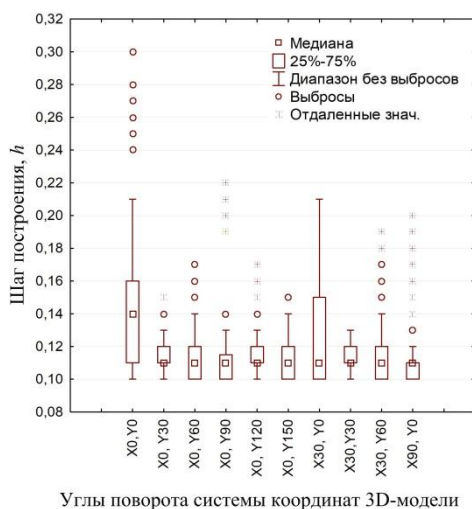


Рисунок 7 – Диаграмма размаха шагов построения h_i в зависимости от углов поворота системы координат 3D-модели изделия

Представленные варианты $h_i = f(Z_i)$ и $S_i = f(Z_i)$ для различных ориентаций изделия (рис. 8, 9) показывают достаточно существенное изменение вида зависимостей. Такие примеры подтверждают достаточно широкие возможности для регулирования характеристик h_i и S_i по оси Z с целью оптимального совмещения с соответствующими распределениями изделий размещенных в рабочем пространстве установки.

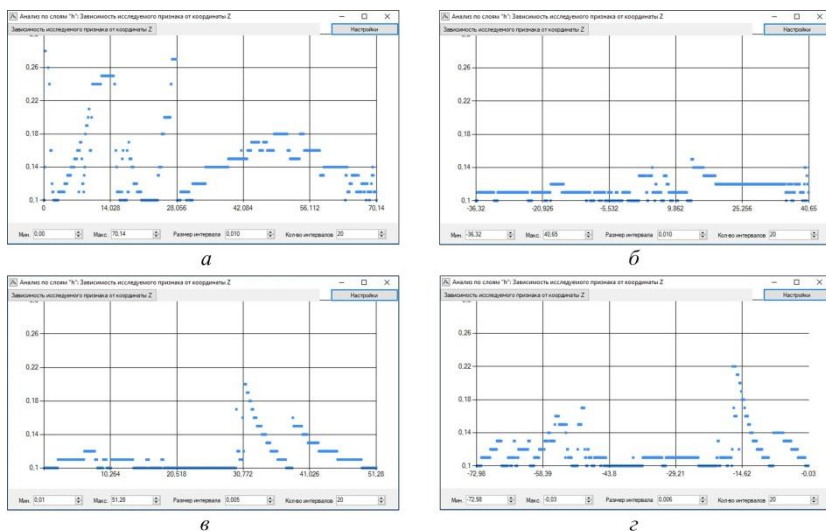


Рисунок 8 – Зависимости шага построения h_i от координат Z_i плоскостей рассечения 3D-модели изделия при следующих углах поворота:
 а – $\varphi_X = 0$, $\varphi_Y = 0$; б – $\varphi_X = 0$, $\varphi_Y = 30$; в – $\varphi_X = 90$, $\varphi_Y = 0$; г – $\varphi_X = 0$, $\varphi_Y = 90$

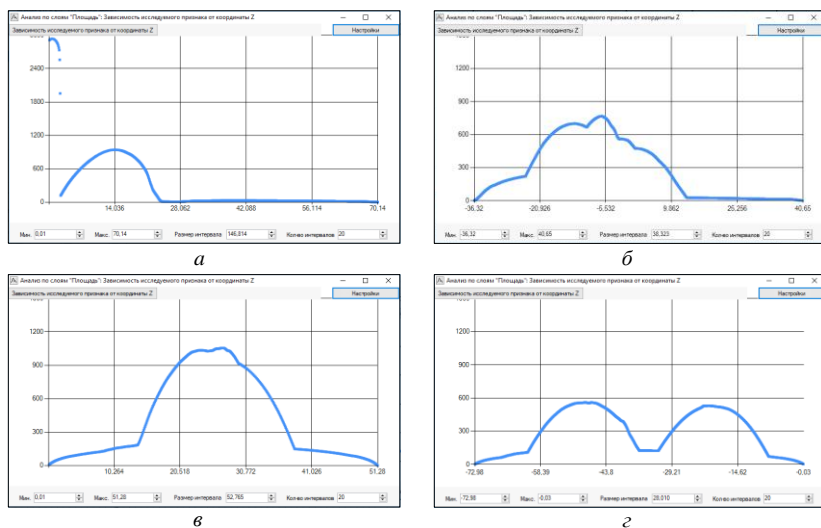


Рисунок 9 – Зависимости площади сечений S_i от координат Z_i плоскостей рассечения 3D-модели изделия при следующих углах поворота:
 а – $\varphi_X = 0$, $\varphi_Y = 0$; б – $\varphi_X = 0$, $\varphi_Y = 30$; в – $\varphi_X = 90$, $\varphi_Y = 0$; г – $\varphi_X = 0$, $\varphi_Y = 90$

В представленных вариантах ориентации изделия (рис. 8) большая часть (75÷100%) шагов построения находится в интервале 0.10÷0.16 мм при максимально допустимой величине $h_{max} = 0.3$ мм. При этом статистические характеристик площади сечений S_i (рис. 9) изменяются в следующих диапазонах: среднее арифметическое $E\{S_i\} \approx 281.4 \div 425.6 \text{ мм}^2$; медиана $Me\{S_i\} \approx 26.5 \div 302.6 \text{ мм}^2$; максимальная величина $\max\{S_i\} \approx 560.2 \div 2936.3 \text{ мм}^2$. В результате путем задания рациональной ориентации возможно изменение распределения площади сечений в широком диапазоне ($Me\{S_i\}$ в 11.4 раз). Такие возможности позволяют совмещать задачу определения ориентации с размещением изделия в рабочем пространстве установки на основе распределения площади сечений слоев построения S_i .

Анализ других изделий показывает существенное влияние геометрической сложности изделия на степень влияния ориентации, на возможности изменения вида зависимости $S_i = f(Z_i)$ и площади сечений. Можно сделать предположение, что на основе полученных модельных данных (рис. 8, 9) возможно обоснованное применение декомпозиции изделия с целью подбора частей изделия с необходимыми характеристиками для оптимального размещения в рабочем пространстве (с целью наибольшего его заполнения).

Выполнялась верификация послойной модели путем оценки отклонений от правильной формы Δ_s заданной 3D-моделью изделия. Величина Δ_s в соответствии с (1) зависит от угла наклона относительно оси Z вектора нормали поверхности и шага построения [11]. Примеры распределения погрешностей формообразования (отклонений от правильной формы) применительно к исходной 3D-модели представлены на рис. 10.

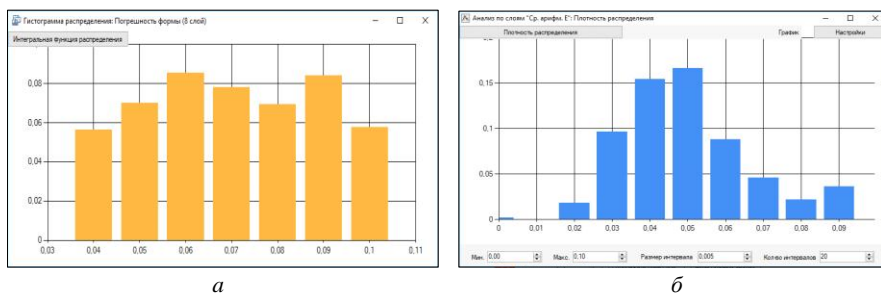


Рисунок 10 – Плотности распределения исследуемых признаков послойной модели:
 а – отклонений от правильной формы Δ_s в 8-м слое; б – средних арифметических величин Δ_s по слоям построения

Анализ отклонений от правильной формы Δ_s для моделей с различной ориентацией позволил выявить следующие диапазоны изменения в статистических характеристиках слоев построения: по средней

арифметической величине $E\{\Delta_S\} \approx 0.018 \div 0.099$ мм; среднеквадратическому отклонению $\sigma\{\Delta_S\} \approx 0.001 \div 0.044$ мм; медиане $Me\{\Delta_S\} \approx 0 \div 0.104$ мм; максимальной величине $\max\{\Delta_S\} \approx 0.019 \div 0.150$ мм. Полученные характеристики указывают на существенную неравномерность отклонений Δ_S по поверхности 3D-модели изделия.

Полученные результаты модельных исследований подтверждают правильность выбранного направления исследования для создания основ комплексного решения оптимизационных задач. С этой целью возникает потребность в количественной оценке сравнительного анализа гистограмм распределения исследуемых признаков.

Выводы по результатам исследования. Возможности статистического анализа характеристик слоев расщечения 3D-модели, таких как шаг построения и площадь сечения, позволяют создать основу для совместного решения задач подготовки к получению изделия аддитивными технологиями по общему критерию оптимизации.

Выбор критерия оптимизации существенно влияет на определяемый вариант рациональной ориентации 3D-модели изделия. Поэтому такой критерий необходимо выбирать с учетом условий получения изделия (единичной или массовой загрузки изделиями установки). При изготовлении одного изделия целесообразно оптимизацию углов поворота модели осуществлять по количеству слоев или высоте построения. В случае совместного изготовления нескольких изделий с целью обеспечения наибольшего заполнения рабочего пространства следует оптимизацию осуществлять:

- по среднеарифметической величине шага построения;
- по виду распределения шага построения;
- по соответствию (минимизации отклонений) зависимости шага построения от координаты плоскости сечения изделия и рабочего пространства установки (загруженного изделиями).

Дальнейшее исследование следует направить на решение задачи сравнительного анализа распределений исследуемых признаков на основе применения ряда критериев проверки их закона.

Список использованных источников: 1. Zhang Y., Bernard A. AM Feature and Knowledge Based Process Planning for Additive Manufacturing in Multiple Parts Production Context, In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2014, pp. 1259–1276. 2. Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol, 2006, 28, pp. 307–313. – DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. 3. Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 45, pp. 714–730. – DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. 4. Martin Baumann. Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. A Doctoral Thesis. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy of Loughborough University, 2012, 266 p. – <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10768>. 5. Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol, 2006, 28, pp. 307–313. –

DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **6.** *Pandey P.M.* Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / *P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy* // *Int. J. of Production Research*. -2004. - Vol. 42. - No. 19. - pp. 4069-4089. **7.** *Paramita Das, Ramya Chandran, Rutuja Samant, Sam Anand*, Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, 2015, pp. 343-354. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>. **8.** *Pulak Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, Sanjay G. Dhande*, Slicing procedures in layered manufacturing: a review, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9 Issue: 5, 2003, pp. 274-288, <https://doi.org/10.1108/13552540310502185>. **9.** *Абдурайимов Л.Н.* Адаптивное разделение на слои исходной 3D модели изделия в технологиях быстрого прототипирования и изготовления / Л.Н. Абдурайимов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. - Симферополь: НИЦ КИПУ, 2009. - Вып. 18. - С. 15-20. **10.** *О. Топçu, Y. Taşcıoğlu and H. Ö. Ünver* “A Method for Slicing CAD Models in Binary STL Format” 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 16-18 May 2011. **11.** *Витязев Ю.Б.* Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. - Харьков, 2004. - 228 с. **12.** *Чернышов С.И.* Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования: дис... канд. техн. наук: 05.02.08. - Харьков, 2006. - 327 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Zhang Y., Bernard A.* AM Feature and Knowledge Based Process Planning for Additive Manufacturing in Multiple Parts Production Context, In *Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014, pp. 1259–1276. **2.** *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 28, pp. 307–313. – DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **3.** *Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V.* Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol*, 2009, 45, pp. 714–730. – DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. **4.** *Martin Baumer*s. Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. A Doctoral Thesis. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy of Loughborough University, 2012, 266 p. – <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10768>. **5.** *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 28, pp. 307–313. – DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **6.** *Pandey P.M.* Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / *P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy* // *Int. J. of Production Research*. -2004. - Vol. 42. - No. 19. - pp. 4069-4089. **7.** *Paramita Das, Ramya Chandran, Rutuja Samant, Sam Anand*, Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, 2015, pp. 343-354. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>. **8.** *Pulak Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, Sanjay G. Dhande*, Slicing procedures in layered manufacturing: a review, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9 Issue: 5, 2003, pp. 274-288, <https://doi.org/10.1108/13552540310502185>. **9.** *Abdurajimov L.N.* Adaptivnoe razdelenie na sloi ishodnoj 3D modeli izdelija v tehnologijah bystrogo prototipirovanija i izgotovlenija / L.N. Abdurajimov // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – Simferopol': NIC KIPU, 2009. – Vyp. 18. – S. 15-20. **10.** *О. Топçu, Y. Taşcıoğlu and H. Ö. Ünver* “A Method for Slicing CAD Models in Binary STL Format” 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 16-18 May 2011. **11.** *Vitjazev Ju.B.* Rasshirenije tehnologicheskikh vozmozhnostej uskorenogo formoobrazovanija sposobom stereolitografii: Dis... kand. tehn. nauk: 05.02.08. - Har'kov, 2004. - 228 s. **12.** *Chernyshov S.I.* Povyshenie jeffektivnosti integrirovannyh tehnologij poslojnogo vyrashhivaniya izdelij na osnove statisticheskogo prognozirovaniya: dis... kand. tehn. nauk: 05.02.08. - Har'kov, 2006. – 327 s.